De mechanica der kleinste deeltjes

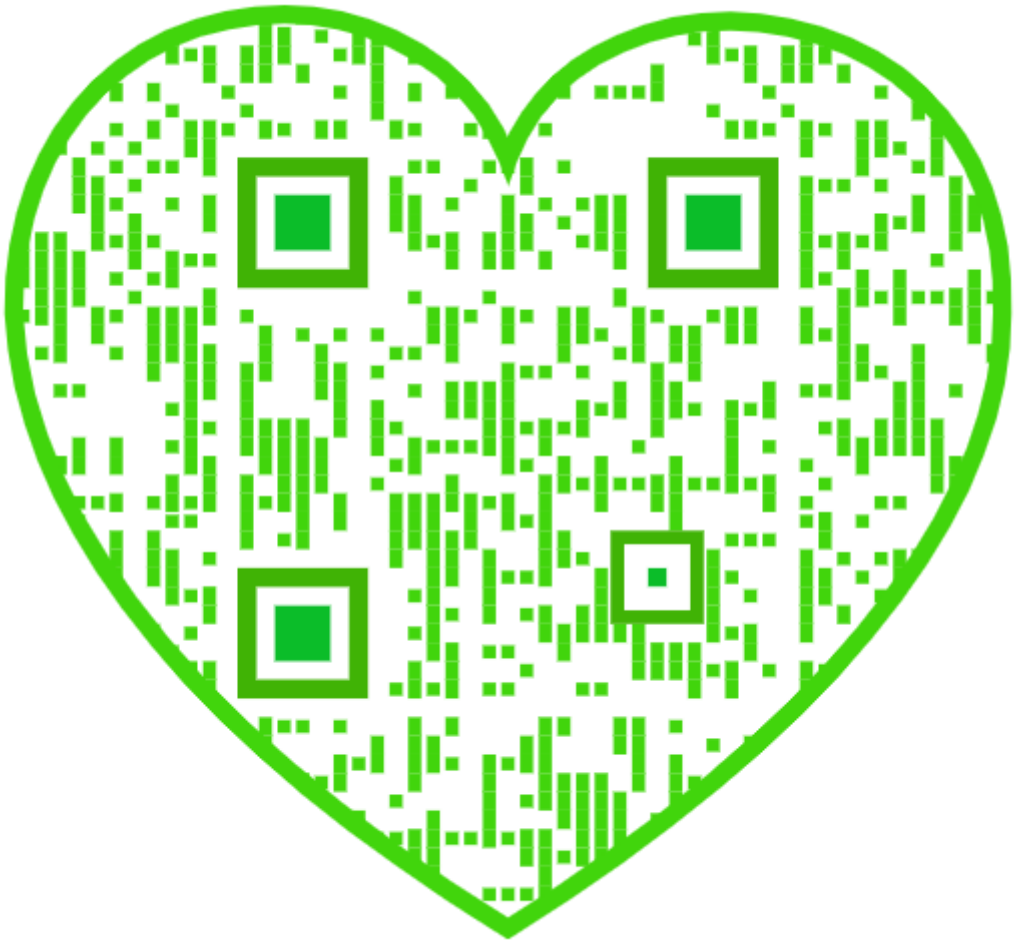
Frits Zernike

bron
Frits Zernike, *De mechanica der kleinste deeltjes*. J.B. Wolters, Groningen 1915

Zie voor verantwoording: https://www.dbnl.org/tekst/zern002mech01_01/colofon.php

Let op: boeken en tijdschriftjaargangen die korter dan 140 jaar geleden verschenen zijn, kunnen auteursrechtelijk beschermd zijn. Welke vormen van gebruik zijn toegestaan voor dit werk of delen ervan, lees je in de gebruiksvoorwaarden.

dbnl digitale bibliotheek voor de Nederlandse letteren



[De mechanica der kleinste deeltjes]

EDELGROOTACHTBARE HEEREN CURATOREN, HOOGGELEERDE HEEREN PROFESSOREN, DAMES EN HEEREN STUDENTEN, EN GIJ ALLEN, DIE HIER AANWEZIG ZIJT,

Zeer gewaardeerde toehoorders!

Verschillende verschijnselen, die in de laatste jaren bestudeerd zijn, hebben een nadere bevestiging opgeleverd van de reeds lang als bijzonder bruikbaar bevonden hypothese, dat alle materie uit kleinste deeltjes, atomen, opgebouwd is. Die bevestiging is van zoodanigen aard, dat men het werkelijk bestaan van atomen daardoor definitief bewezen moet achten. Ook de kleinste deeltjes, die de electrische verschijnselen teweegbrengen, de electronen, hebben daarmee, en ook onafhankelijk ervan, een vroeger onvoorziene mate van 'tastbaarheid' verkregen. Zoo kan ik dus over atomen en electronen spreken als over experimenteel waargenomen zaken. Zonder op de bedoelde verschijnselen en proefnemingen verder in te gaan, wil ik er nog op wijzen, dat zij ons een nauwkeurige kennis verschaft hebben van de talrijkheid dier kleinste deeltjes, en dus ook van het gewicht van één atoom, van massa en lading van één electron.

Men zou wellicht verwachten, dat daarmee nu een bevredigende afsluiting onzer theoriën, een afgerond geheel, verkregen was. Echter zijn in denzelfden tijd nieuwe raadselen te voorschijn gekomen, wier oplossing niet slechts een uitbreiding of wijziging van de theorie schijnt te vorderen, maar een algeheele herziening, zelfs van haar grondslagen.

Zoo is de natuurkundige wetenschap in een tijdperk gekomen, waarin vooral haar oudere beoefenaren zich bezorgd afvragen of dan alle vóór en door hen als juist erkende principes en als waar bevonden natuurwetten zullen moeten worden opge-

geven, terwijl vele van de jongeren zich, ietwat overmoedig, beijveren, alles, wat niet met hun nieuwe en nog onvolkomen opvattingen overeenstemt, voor verouderd en uitgediend te verklaren.

Ligt het dan ook niet in den aard der zaak, dat de door ons opgestelde natuurwetten nooit geheel juist, nooit volkomen waar zijn, en moet het dus niet steeds op ontgoocheling uitloopen wanneer men dat uit 't oog verliest en aan die wetten anders dan benaderde geldigheid toekent? Inderdaad, de voortgang der theoretische natuurkunde, waardoor een steeds dieper doordringende verklaring der verschijnselen in ons bezit komt, en een steeds nauwkeuriger berekening en voorspelling daarvan mogelijk wordt, doet aan een proces van opeenvolgende benadering denken. Evenals bij een wiskundige benadering volgens een dergelijk proces, komt de natuurkundige bij iedere volgende stap dichter tot de waarheid en als men, de wiskundige analogie vervolgende, hieraan toevoegt: zonder haar ooit te bereiken, dan zal dit hem geenszins ontmoedigen.

Bij een berekening, die tot op zekeren graad van benadering verricht is, kan men soms door een enkele bewerking meer te verrichten, de nauwkeurigheid gemakkelijk verhoogen. Als men dit evenwel eenige malen herhaalt, komt er onvermijdelijk een punt, waar een verder gaan niet zou baten, indien niet eerst de vorige stappen der berekening met grooter nauwkeurigheid herhaald werden. Zoo gaat het ook in de theoretische natuurwetenschap. Dikwijls worden nieuwe feiten ontdekt, die met de theorie in overeenstemming zijn te brengen door slechts haar laatste détails wat te wijzigen of aan te vullen. Dan is het verkrijgen van de volgende benadering dus betrekkelijk gemakkelijk. Daarentegen is het soms noodig, ook vroeger verkregen resultaten te verbeteren, om hen tot dezelfde nauwkeurigheid te brengen als de nieuw toe te voegen termen. Dat behoeft ons evenwel niet te verontrusten, want het bewijst volstrekt niet, dat we met die vroegere theorie op den verkeerden weg waren.

De theoretische beschouwingen, die men thans door nieuwe wil vervangen, hebben betrekking op de wetten, volgens welke atomen en electronen zich bewegen en op elkaar inwerken, op wat men in één woord hun mechanica kan noemen. Het is deze *Mechanica der kleinste deeltjes* die ik tot onderwerp van bespreking kies: naast het weinige positieve, dat zich tegenwoordig daaromtrent laat zeggen, wil ik de vele nieuwe aanwijzingen ter sprake brengen van de richtingen waarin men verder hoopt te komen.

Laten we ons eens voorstellen, dat men voor die kleinste deeltjes bepaalde bewegingswetten, om welke reden dan ook, aanneemt. Dan is het in beginsel mogelijk, waargenomen eigenschappen der stoffen daaruit af te leiden, dus daarmee te verklaren. Dat die afleiding in vele gevallen zeer moeilijk is, doet daarbij voor 't oogenblik niet ter zake. Indien alle zoo berekende eigenschappen met de waarneming overeenstemden, zou de gebruikte mechanica der atomen ons bevredigen. Het omgekeerde vraagstuk, uit de bekende eigenschappen der stof de mechanica harer kleinste deeltjes te vinden, is nu wat zich in werkelijkheid voordoet. Het regelrecht oplossen daarvan zou niet slechts veel moeilijker zijn, maar de oplossing is ook onvoldoende bepaald. Bij het zoeken naar een oplossing moet men daarom overwegingen gebruiken, die aan het vraagstuk op zichzelf vreemd zijn. Men wenscht een *eenvoudige* oplossing, d.w.z. een die zoo min mogelijk van reeds gebruikelijke vormen afwijkt, een *voordeelige* oplossing, d.w.z. een waaruit de noodige gevolgtrekkingen overzichtelijk, zonder al te bezwaarlijke wiskundige ontwikkelingen, zijn af te leiden.

De wijze, waarop men steeds de oplossing van dit vraagstuk aangevat heeft, is gelegen in het geven van *gedeeltelijke* oplossingen, dat zijn oplossingen, die de verklaring geven van één of van een groep van eigenschappen der stof, maar van het verklaren van alle overige eigenschappen afzien. Dat is in vele gevallen inderdaad mogelijk. Dat *verklaren* toch kan niet anders zijn dan een terugbrengen van zeker *molair*, d.i.

voor de geheele massa geldend, verschijnsel, tot een *ander* moleculair verschijnsel. Zoo kunnen warmteverschijnselen verklaard worden door bewegingen der moleculen, maar we zullen niet van een verklaring spreken, wanneer iemand zou zeggen, dat een stof warm is, als haar moleculen warm zijn, dat ze zich bij verwarming uitzet, omdat haar moleculen hetzelfde doen.

Waardoor zal men zijn keus bepalen tusschen te verklaren en onverklaard te laten verschijnselen? Vooreerst zal men ingewikkelde of nog onvoldoend onderzochte verschijnselen onverklaard laten; evenzeer echter de allereenvoudigste en best bekende. Immers het verklaren kan niet anders zijn dan terugbrengen tot andere, zoo eenvoudig mogelijke verschijnselen, en deze laatste blijven noodwendig onverklaard.

Nu waren reeds in de laatste helft van de achttiende eeuw de door GALILEI en NEWTON opgestelde 'wetten der mechanica' de best bekende en het nauwkeurigst aan de waarneming, vooral van de hemellichamen, getoetste natuurwetten. In het voorbijgaan zij even opgemerkt, dat ik het woord 'mechanica' alreeds in zijn algemeene beteekenis van 'bewegingsleer' gebruikt heb. Nog niet lang geleden dacht men daarbij echter nooit aan anders dan 'de' mechanica van Galilei-Newton. Deze zal ik, zooals tegenwoordig gebruikelijk is, uitdrukkelijk als 'klassieke mechanica' onderscheiden.

Alleszins begrijpelijk is het dus, dat men de genoemde wetten als de fundamenteele nam, die niet verklaard behoefden te worden, maar waartoe men integendeel andere verschijnselen, kon het zijn alle andere, trachtte terug te brengen. Het is dus slechts schijnbaar paradoxaal, dat de oudste moleculairtheoriën in de eerste plaats die wetten voor de moleculen geldig verklaarden, die aan de hemellichamen waren waargenomen.

Gedurende zóó langen tijd golden de klassiek-mechanische wetten als de van zelf sprekende, fundamenteele wetten, dat men de mogelijkheid van een andere keuze ging vergeten, en 'verklaren' van een verschijnsel identiek ging vinden met: tot mechanica terugbrengen. De bekrompenheid van die op-

vatting wordt tegenwoordig duidelijk ingezien, nu men beproefd heeft de grondvergelijkingen der electriciteitsleer de plaats van de wetten der klassieke mechanica te doen innemen, en verder de laatsten beschouwen gaat als grenswetten, vergelijkbaar met de wet van Boyle bijvoorbeeld.

Over de oudste gedeeltelijke oplossing van ons probleem, de moleculairtheorie, die door BOSCOVICH in het midden der 18de eeuw opgesteld, en vooral door LAPLACE en POISSON uitgewerkt werd, wil ik het een en ander meedeelen, niet slechts als eenvoudig voorbeeld van een gedeeltelijke oplossing, maar ook omdat een ontdekking van den laatsten tijd de mogelijkheid opent, dat ze nog belangrijke resultaten zal gaan opleveren.

Die theorie beschouwt de lichamen als opgebouwd uit een groot aantal punten, die aantrekkende of afstootende krachten op elkaar uitoefenen, en onder de werking van die krachten in evenwicht zijn. Zij kan hoofdzakelijk de capillaire en elastische werkingen verklaren, de warmte in het bijzonder blijft onverklaard. De door POISSON met behulp van deze voorstellingswijze verkregen uitkomsten voor de elasticiteit van vaste lichamen bleken niet met de waarneming in overeenstemming te zijn. Wordt een staaf in de lengterichting bijv. één procent uitgerekt of samengedrukt, dan zou volgens POISSON daarbij de dikte van den staaf juist één kwart procent kleiner, resp. grooter worden. In werkelijkheid vindt men niet deze verhouding van ¼, maar een verhouding μ, die van den aard der onderzochte stof afhangt. Voor caoutchouc is μ bijv. ½, voor kurk 0, en bij sommige kristallen, zooals pyriet, vindt men zelfs, dat bij uitrekking in de lengte ook de dikte toeneemt! De theorie levert een te geringe verscheidenheid: bij amorphe stoffen zouden volgens haar de elastische eigenschappen door één enkele constante bepaald zijn, terwijl men er experimenteel twee vindt, voor kristallen, die in verschillende richtingen verschillende elastische eigenschappen vertoonen, leverde de theorie in 't algemeenste geval 15 in plaats van 21 constanten.

Dit gebrek aan overeenstemming bracht indertijd zelfs het algemeene denkbeeld van een moleculairen bouw der stoffen niet weinig in discrediet. Ten onrechte, want VOIGT heeft aangetoond, dat men uit de theorie 21 constanten vinden kan, door alleen de onderstelling van centrale krachten, die POISSON gemaakt had, te laten vallen, en KELVIN, dat men ook zonder dat tot het volle aantal komt, indien maar de rangschikking der kristalmoleculen iets algemeener aangenomen wordt, dan door POISSON geschied was.

Bij gebrek aan nauwkeurige gegevens omtrent de ligging der moleculen en atomen in de kristallen moest de theorie zich tot deze algemeene uitkomsten bepalen. Thans schijnt het mogelijk verder te komen en de krachten, waarmee de atomen gebonden zijn althans in eenvoudig gebouwde kristallen tot in bijzonderheden te berekenen. Onverwacht heeft men namelijk in de Röntgenstralen een middel gevonden, om de ligging der atomen in kristallen op te sporen. Nog niet drie jaren geleden ontdekte LAUE de buiging van Röntgenstralen bij het doorloopen van een kristalplaatje. Sindsdien ook door vele andere onderzoekers bestudeerd, heeft dit merkwaardige verschijnsel ons vooreerst de golflengte der Röntgenstralen doen kennen. Zoo weet men thans, dat bijvoorbeeld de door het metaal palladium uitgezonden Röntgenstralen grootendeels een golflengte hebben van één 17 millioenste millimeter, d.i. een tienduizendste van de golflengte van het gele licht. Juist een zoo kleine maatstaf heeft men noodig om de onderlinge afstanden van de lagen atomen te bepalen, waaruit de kristallen opgebouwd zijn, en vooral BRAGG heeft geleerd, hoe die bepaling te verrichten en uit de gevonden afstanden in verschillende richting de geheele structuur te doorgronden. Als eenvoudig voorbeeld noem ik de diamant. BRAGG vindt daarvoor een rangschikking van koolstofatomen in een regelmatig ruimtenet, dat de kristallografische symmetrie en de splijtbaarheid van de stof verklaart en waarin verder: *ieder C-atoom vier andere* dicht om zich heen heeft in de richtingen van het

centrum van een regelmatigen tetraëder naar zijn vier hoekpunten, een rangschikking dus, zooals VAN 'T HOFF die reeds lang geleden met zooveel succes in organische verbindingen heeft aangenomen. Bepaalde chemische moleculen kan men in dit ruimtenet niet aanwijzen, zoodat men haast geneigd zou zijn te zeggen, dat iedere diamant één enkel molecuul voorstelt! De bedoelde berekening van de krachten, die de atomen gebonden houden, zou hier mogelijk zijn, indien slechts de noodige experimenteele metingen van de elasticiteit van diamant niet ontbraken.

Ook de struktuur van de reeds genoemde pyriet is met de Röntgenstralen gevonden: ieder zwavelatoom is daarin door drie naastbijgelegen ijzeratomen en één ander zwavelatoom omgeven, ieder ijzeratoom door zes zwavelatomen. Het is daarbij nog niet gemakkelijk in te zien, aan welke bijzondere atoomverbindingen het merkwaardige elastische gedrag van deze stof toegeschreven zal moeten worden.

Het nu besprokene behoort blijkbaar tot de *statica* der atomen. Ik heb getracht U te doen zien dat alle gegevens aanwezig zijn om een belangrijke vooruitgang van dat onderdeel der atoom-mechanica in de naaste toekomst mogelijk te maken.

Geheel anders is het uitzicht voor de *dynamica* der atomen. Deze werd het eerst en haast uitsluitend ontwikkeld voor gassen. Het kan niet verwonderen dat de gastheorie sinds het midden van de negentiende eeuw snelle vorderingen maakte. Enkele eenvoudige voorstellingen omtrent rondvliegende moleculen blijken voldoende, om de belangrijkste eigenschappen van gassen uit hun moleculairen bouw te verklaren. De moeilijkheden, die men daarbij telkens nog weer ontmoet, liggen meer op wiskundig gebied.

De voorstellingen, die men zich duidelijkheidshalve van de wisselwerking der gasmoleculen maakt, door hen bijvoorbeeld als veerkrachtige bollen te denken, hebben langen tijd op geen van de resultaten der kinetische gastheorie eenigen invloed.

Duidelijk blijkt dat, als MAXWELL dezelfde resultaten verkrijgt door gasmoleculen te beschouwen, die geen uitgebreidheid hebben en dus nooit werkelijk botsen kunnen, maar die in plaats daarvan elkaar afstooten met krachten omgekeerd evenredig aan de vijfde macht van hun onderlingen afstand. De overeenstemming van de resultaten der gastheorie met de proefneming gaf dus geenerlei aanwijzing omtrent den aard van de onderlinge inwerkingen der moleculen.

Het merkwaardige feit, dat de inwendige wrijving van gassen geheel onafhankelijk is van hun druk, werd het eerst theoretisch gevonden. Dat het door het experiment geheel bevestigd werd, geldt zeer terecht steeds als een van de schoone triumfen der gastheorie. Daar zelfs dit resultaat evenzeer met Maxwell's krachtcentra als met de meer gebruikelijke voorstelling verkregen wordt, kan het dus evenmin eenig uitsluitsel geven omtrent de wijze, waarop de gasmoleculen bij hun nadering op elkaar inwerken.

Een belangrijke uitzondering in dit opzicht vormt de wijze, waarop diezelfde inwendige wrijving van de temperatuur afhangt. Voordat proefnemingen hieromtrent gedaan waren, had MAXWELL, uitgaande van als harde bollen botsende moleculen, afgeleid dat die grootheid evenredig moest zijn met den wortel uit de absolute temperatuur van het gas. Met behulp van zijn krachtcentra vond diezelfde onderzoeker later een inwendige wrijving evenredig met de absolute temperatuur zelf.

Met dit dubbelzinnige theoretische resultaat - in overeenstemming, zou ik bijna zeggen, leverde de waarneming een geheel ander verloop met de temperatuur, dat in 't geheel niet door een eenvoudige formule scheen te kunnen worden voorgesteld. Het is de verdienste van SUTHERLAND, de theorie hier in eere hersteld te hebben. Door een aantrekkende werking van de moleculen, voordat deze botsen, in rekening te brengen, leidde hij een formule voor de inwendige wrijving af, die zich bij de waarnemingen nauwkeurig aansluit. Onderlinge aantrekking van de gasmoleculen was reeds veel eerder door VAN DER WAALS

gebruikt om tot zijn beroemde toestandsvergelijking te komen. Belangrijk is SUTHERLAND'S resultaat dan ook vooral, wijl het ons geleerd heeft, dat de voorstelling van een *botsing* van gasmoleculen veel meer met de werkelijkheid overeenkomt dan de geleidelijke afstooting van krachtcentra. Dat SUTHERLAND de gasmoleculen, ook de chemisch uit meerdere atomen opgebouwde, als bolvormig behandelen kan, wijst er overigens duidelijk op, dat we ook hier met een benadering te doen hebben, die voor het verschijnsel in kwestie evenwel voldoende blijkt te zijn.

Grooten invloed hebben daartegenover vorm en beweging van elk molecuul op zichzelf op een andere grootheid: de soortelijke warmte. Dat blijkt door de proefneming; het volgt evenzeer uit de theorie. Deze leert, dat de aan een gas toegevoerde warmte een sneller bewegen van de moleculen tengevolge heeft. Denken we ons een bepaalde hoeveelheid van een gas in een vat opgesloten, dan zal de toegevoerde warmte equivalent zijn met de vermeerdering van het arbeidsvermogen van beweging van de gasmoleculen. Gemakshalve zullen we de zoogenaamde moleculaire hoeveelheid gas, d.i. ruim 22 liter, nemen. Reeds een eenvoudige theoretische beschouwing leert dan, dat daarin bij een temperatuursverhooging van 1^o de voortschrijdende beweging van de moleculen zooveel sneller wordt, dat daarvoor een warmte-toevoer van 3 caloriën noodig is, een bedrag dat voor alle gassen gelijk is. Experimenteel vindt men in enkele gevallen juist ditzelfde bedrag, n.l. voor gassen, wier molecuul slechts één enkel atoom bevat. Voor alle twee-atomige gassen blijkt de moleculaire soortelijke warmte 5 te bedragen, voor samengestelder moleculen nog weer meer. Om 22 liter, waterstof bijvoorbeeld, één graad te verwarmen, zijn dus, behalve de 3 caloriën, wier bestemming de theorie reeds aangegeven heeft, nog 2 meer noodig. Deze verklaart men ongedwongen uit het sneller worden van de aswentelingen der moleculen. Dat de toename van het daaraan beantwoordende arbeidsvermogen, de rotatie-energie, juist ⅔ moet zijn

van de toename der translatie-energie, is minder gemakkelijk uit de theorie af te leiden.

De zeer algemeene stelling, die men daarvoor noodig heeft, is eerst door de uitvoerige onderzoekingen van MAXWELL, BOLTZMANN en GIBBS, en de kritiek daarop van andere eminente mannen, als KELVIN, nauwkeurig bekend geworden. Het is de zoogenaamde *equipartitie-wet*, die aldus luidt: de gemiddelde waarde van de kinetische zoowel als van de potentieele energie, is voor iedere vrijheidsgraad dezelfde. Men late zich hier niet misleiden door de gebruikelijke benaming equipartitie-'wet': het is geen natuurwet waarom het hier gaat, maar een theoretische stelling, en door de genoemde onderzoekingen, aangevuld door die van EHRENFEST, weten wij nauwkeurig, uit welke praemissen die stelling met logische noodwendigheid volgt. Van die praemissen wil ik slechts de voor ons belangrijkste noemen: men moet aannemen, dat voor het beschouwde stelsel de wetten der klassieke mechanica gelden.

Hoe wordt nu deze equipartitie-wet gebruikt om de reeds beschouwde soortelijke warmte van een gas theoretisch te vinden? Een stoffelijk punt, dat zich in een ruimte vrij bewegen kan, heeft *drie* graden van vrijheid, overeenkomende met de bewegingsmogelijkheid in drie onderling loodrechte richtingen. Een vast lichaam heeft *zes* vrijheidsgraden, daar zijn stand op ieder oogenblik eerst door zes grootheden volkomen bepaald kan worden. Volgens de equipartie-stelling nu zal de moleculaire soortelijke warmte evenredig zijn met het aantal vrijheidsgraden van alle moleculen te zamen in 22 L. gas, en dus ook met het aantal vrijheidsgraden van één molecuul. De toevallige, trouwens slechts benaderde, getallen-overeenstemming van 3 caloriën voor de 3 vrijheidsgraden der voortschrijdende beweging geeft dus: de moleculaire soortelijke warmte is gelijk aan het aantal vrijheidsgraden van het molecuul. Voor de eerste moet men dus steeds een geheel aantal caloriën vinden, indien de equipartitie-wet inderdaad een natuurwet is. Voor twee-atomige gassen geeft de waarneming dit

inderdaad, n.l. 5 caloriën, voor meer samengestelde echter volstrekt niet. Voor de twee-atomige gassen zou de theorie dus nog doorgaan, mits men aan de moleculen 5 vrijheidsgraden toekent. Dit is als volgt te bereiken. Denk de atomen, van waterstof bijvoorbeeld, eerst los van elkaar. Elk paar heeft dan 6 vrijheidsgraden. Verbind nu alle atomen in paren door volkomen stijve staafjes van bepaalde lengte. Ieder paar verliest dan één vrijheidsgraad, en de zoo gevormde twee-atomige moleculen houden dus 5 vrijheidsgraden over. Hier ziet men duidelijk het merkwaardig strenge van de equipartitie-wet. De zesde vrijheidsgraad gaat slechts *dan* verloren, indien het verbindingsstaafje absoluut onveranderlijk van lengte is. Zouden we er een, zij het ook nog zoo geringe, rekbaarheid aan toekennen, dan bleven er zes vrijheidsgraden, en daar die zesde dan ook potentieele energie zou hebben, werd de soortelijke warmte zelfs 7 in plaats van 5! Deze merkwaardige discontinuïteit van de equipartitie-wet maakt, dat ze geenerlei aanpassingsvermogen, geenerlei plooibaarheid bezit. Ze zal òf in de natuur nauwkeurig moeten gelden, òf in het geheel niet. Het laatste is het geval. Zoo heeft EUCKEN voor enkele jaren gevonden, dat de soortelijke warmte van waterstof bij lage temperaturen minder dan 5 wordt, en geleidelijk daalt tot 3 bij de laagst onderzochte temperaturen. Daardoor wordt regelrecht bewezen, dat in volkomen tegenspraak met de equipartitie, de wentelingen van de waterstofmoleculen bij die lage temperatuur practisch niet meer merkbaar zijn, en dat die vrijheidsgraden eerst bij hooger temperaturen langzaam aan tot hun recht komen. Sommerfeld geeft dit algemeen aldus aan: ‘Man soll die Freiheitsgrade wägen und nicht zählen’. Maar de equipartitie-wet laat niet anders dan het discontinue tellen toe. De proeven - ik heb nog slechts een enkele genoemd - noodzaken ons dus, die wet en daarmee de strenge geldigheid der klassieke mechanica voor de moleculaire werkingen, te verwerpen.

Zou misschien een geringe wijziging, of een geringe in de

natuur aanwezige storende invloed, die de theorie ten onrechte verwaarloosd heeft, voldoende kunnen zijn om aan de ijzeren strengheid van de equipartitie te ontkomen? Dat dit inderdaad het geval moet zijn, zien we uit een door JEANS aangegeven analogon.

Stel dat we eenige waterreservoirs naast elkaar hebben staan, die onderaan door buizen met elkander verbonden zijn. Wordt in één van alle water gegoten, dan staat het na eenigen tijd in alle even hoog. Zijn de verbindingsbuizen heel nauw, en de reservoirs groot, dan zal het zeer lang kunnen duren, voordat die evenwichtsstand bereikt wordt. Op dien stand zelf, het overal even hoog staan van het water, heeft dat evenwel geen invloed. Stel U nu voor, dat de verbindingsbuis naar een bepaald reservoir steeds nauwer gemaakt wordt; tot het laatste oogenblik, zoolang de verbinding niet absoluut afgesloten is, blijft de bereikte eindhoogte dezelfde. Bij geheel afsluiten wordt die hoogte dan plotseling nul. Deze discontinue overgang verdwijnt, indien een kleine storing aanwezig is, zooals een gering lekken van het reservoir. Naarmate de verbindingsbuis nauwer wordt, zal immers het wegstroomen door het lek meer invloed krijgen, en de waterspiegel in het beschouwde reservoir zal steeds meer beneden die in de andere reservoirs blijven.

In dit beeld zijn de reservoirs het analogon van de vrijheidsgraden, het water van de energie. Maar wat zou het lek kunnen zijn? We gaan weer terug tot de waterstofatomen, die we door staafjes verbonden hadden, welke volkomen onrekbaar, of min of meer veerkrachtig konden gedacht worden. Laat ons deze staafjes eerst onrekbaar nemen en het gas zoo aan zich zelf overlaten: onderlinge beweging van twee atomen in de staafinrichting is er dan niet. Nu wil ik me voorstellen, dat ze als bij tooverslag alle rekbaar gemaakt worden: dan komen er trillingen van de atomen naar elkaar toe en van elkaar af. De energie daarvoor moet geput worden uit de energie van de andere vrijheidsgraden. Het is zeer wel mogelijk,

dat die energie-overgang heel langzaam zal plaats grijpen. Als er echter geen ‘lek’ is, zal toch de eindtoestand steeds dezelfde zijn. Ze wordt door de equipartitie-wet gegeven. Is het verbindingsstaafje moeilijk rekbaar, dan worden de trillingen van de atomen heel snel. Dán is het zeer goed denkbaar, dat de trillingsenergie ontsnapt op een wijze, waarmede we geen rekening gehouden hebben: door straling. Daarmee is de overeenkomst met het lekke reservoir van JEANS voltooid. Toch zal het ons niet baten een nauwkeurige berekening van deze kwestie op touw te zetten: als we de energie laten wegvloeien door straling, zal de eindtoestand zijn, dat de moleculen niet meer bewegen en alle energie in den vorm van straling overgegaan is. Wat we bereikt hebben is alleen de aanwijzing, dat de stralingsverschijnselen in onze beschouwing zullen moeten worden opgenomen.

Laat ik even samenvatten, wat we nu verkregen hebben. Wordt de mechanica van Newton voor moleculen en atomen aangenomen, dan kan men vele verschijnselen uitstekend verklaren. De juistheid van het aannemen van de klassieke mechanica wordt door die verschijnselen volstrekt niet op een scherpe proef gesteld. Dat is wel het geval door de soortelijke warmte. Die toont ons, dat de aanname *onjuist* was. Een kleine verandering is misschien voldoende. Wellicht kunnen de stralingsverschijnselen daaromtrent opheldering geven.

En waarlijk, de stralingsverschijnselen *hebben* opheldering gegeven. Maar een opheldering die zoo vreemdsoortig, zoo ondoorgrondelijk is, dat zij nog bijna niemand recht bevredigt. Uitgaande van de straling heeft men in onze twintigste eeuw een grootsch gebouw opgetrokken, de theorie der energie-elementen, in de wandeling de ‘kwantentheorie’ genoemd. Is het inderdaad opgetrokken? Spotters beweren, dat men met het dak begonnen is! De bewoners zijn practische menschen, zij zijn van oordeel, dat de wijze waarop het gebouw ontstaan is er weinig meer toe doet, nu het eenmaal staat en deugde-

lijk blijkt te zijn. Maar niet ieder is op dat laatste even gerust, want - de fundamenten ontbreken.

In aansluiting aan dat practische oordeel zal ik mij ervan onthouden, de in 't oog vallende tekortkomingen der kwantentheorie breed uit te meten. Integendeel wil ik, buiten den historischen gang om, iets doen zien van den tegenwoordigen stand, en alleen van de best bevestigde deelen. Vooropgesteld zij, dat *niet* gevonden is, welke andere wetten in de wereld der atomen voor die van de klassieke mechanica in de plaats moeten komen. Wat men *wel* weet is welke wet de equipartitie vervangen moet. Daarvoor geeft de straling het voorbeeld. Gemakkelijker voor te stellen zijn de daarbij optredende bijzonderheden in het zeer analoge geval van een vast lichaam. Ik verzoek U, daarvoor weer te denken aan de oude, statische moleculair-theorie, die geen rekening hield met de warmtebeweging, zooals ik reeds besprak. Naar tegenwoordige opvatting geeft deze een model van een vast lichaam, zooals het bij het absolute nulpunt is: een mechanisch stelsel in evenwicht. Wordt het lichaam verwarmd, dan gaan de moleculen, of beter de punten van het ruimtenet, dat zijn de atomen, kleine bewegingen uitvoeren. Het geheele mechanische stelsel voert kleine trillingen uit om zijn evenwichtsstand. Dit is een bekend mechanisch probleem, dat aanleiding geeft tot het invoeren van de zoogenaamde ‘principale trillingen’. Deze hebben de eigenschap, elk voor zich te blijven voortbestaan, onafhankelijk van de anderen. Ik wijs er even uitdrukkelijk op, dat tot nog toe voortdurend aan beweging volgens de klassieke mechanische wetten gedacht is. Blijven we bij deze, dan zullen we nu verder moeten aannemen, dat in het vaste lichaam elke principale trilling gemiddeld dezelfde energie heeft. De soortelijke warmte wordt dan constant, en de atoomwarmte voor alle lichamen gelijk. Bij hooge temperatuur is dat volgens DULONG en PETIT met de werkelijkheid in overeenstemming. Bepaalt men evenwel de soortelijke warmte bij steeds lager temperatuur - en dat is vooral door NERNST gedaan - dan

blijkt dat zij ook hier geleidelijk afneemt, en wel tot nul. Opmerking verdient nog, dat de principale trillingen volgens definitie *geen* energie met elkaar uitwisselen, dus met *niet* verbonden reservoirs zouden overeenkomen. Daarbij kan toch geen sprake zijn van even hoogen waterstand? Dit bezwaar is slechts schijnbaar: in 't algemeen gaan de principale trillingen alleen bij eerste benadering niet in elkaar over, en bewerken termen van hooger orde een langzame uitwisseling.

Om nu de soortelijke warmte van het vaste lichaam volgens de kwantentheorie te vinden, gaat men de energie op andere wijze over de principale trillingen verdeelen, n.l. volgens de verdeelingswet van PLANCK. Men vrage nu niet, hoe die verdeeling tot stand komt of in stand blijft. Men heeft slechts die, algemeen voor trillende stelsels geldende, wet te gebruiken, om tot merkwaardig goed met de waarneming overeenstemmende resultaten te komen. PLANCK'S wet geeft dus aan, hoe dat ‘wegen’ van de vrijheidsgraden geschieden moet: naarmate de verbinding stijver is, wordt het door zijn formule gegeven gewicht kleiner. Het berekenen van de principale trillingen van het vaste lichaam is door BORN en VON KARMAN, en op eenvoudiger, meer schematische wijze door DEBIJE geschied.

Analoog aan de trillingen in het vaste lichaam kunnen de trillingen in den aether behandeld worden. Men heeft immers de licht- en warmte-stralingen vaak beschouwd als elastische trillingen in een middenstof, die zich daarbij als een vaste stof gedraagt. Een voor ons doel belangrijk verschil is alleen, dat we aan dien hypothetischen elastischen lichtaether geen moleculaire structuur moeten toekennen, dat dit medium continu is. Dat brengt mee, dat men in een begrensd volume van dien aether weer principale trillingen onderscheiden kan, maar nu in oneindig aantal. De wijze, waarop de energie zich over die trillingen verdeelt, is hier, en dit is het belangrijke, voor directe waarneming toegankelijk. Toen dan ook nauwkeurige metingen in het spectrum van het zoogenaamde ‘zwarte lichaam’ verkregen waren, kon PLANCK bij het begin van deze eeuw

daaruit de reeds genoemde nieuwe verdeelingswet afleiden. Vier jaar later werd die wet door EINSTEIN het eerst op de materie toegepast. Naar de tegenwoordig met haar verkregen resultaten te oordeelen schijnt die verdeelingswet van PLANCK zeer algemeen geldig te zijn. Nog zij opgemerkt, dat de door haar voorgeschreven verdeeling voor hooge temperaturen en ook voor langzame trillingen slechts onmerkbaar van equipartitie afwijkt. Dat maakt, dat zij ook het gedeeltelijke succes van de equipartitie-wet verklaart.

Wat ik hier omtrent de nieuw gevonden verdeelingswet vermeld heb, kan blijkbaar geen aanspraak op den naam 'theorie' maken. De gegeven empirische beschouwing stelt echter in staat, vele van de belangrijke resultaten der kwantentheorie te verkrijgen. Het blijkt dus, dat *die* resultaten onafhankelijk van eenige theorie kunnen worden gevonden.

Een gewichtige bedenking tegen het gebruik van de verdeelingswet van PLANCK op deze wijze kan men daarin zien, dat eerst een eindweegs met de klassieke mechanica gewerkt wordt, om de trillingen te definiëeren en te berekenen, en dat dan opeens die mechanica verloochend wordt, en eigenlijk de onbekende mechanica wordt aangenomen, die tot de verdeelingswet van PLANCK voert. POINCARÉ, die dit bezwaar aanvoert, laat erop volgen: 'men vergete niet, dat iedere stelling gemakkelijk bewezen kan worden, indien in het bewijs een logische tegenstrijdigheid ingevoerd wordt'. Naar mijn meening kan het gedeeltelijk volgen van klassieke mechanica in dit geval aldus wel gerechtvaardigd worden. De verdeelingswet is zeer gevoelig voor een geringe wijziging van de mechanische wetten, waarvan men uitgaat. De meeste andere gevolgen van de mechanische behandeling van het probleem zijn zeer veel minder gevoelig daarvoor. Daarom kan voor die laatsten de klassieke mechanica een volkomen voldoende benadering geven, terwijl ze een geheel onbruikbare verdeelingswet levert.

Aan bezwaren van dezen aard zal natuurlijk geheel te ontkomen zijn, als een stel mechanische wetten voor de beweging

der atomen zal zijn gevonden, dat tot de verdeelingswet van PLANCK aanleiding geeft. In het terugrekenen van de verdeelingswet tot de mechanica heeft men een enkelen stap kunnen doen. De verkregen energetische theorie beschrijft *niet* de krachten en hun uitwerkingen, geeft dus niet de bewegingsvergelijkingen, maar leert alleen hoe de *energie* zich gedraagt: zij neemt aan, dat de energie van een trilling niet *geleidelijk* veranderen kan, maar alleen sprongsgewijze. De grootte van dien sprong, het energie-quantum, is volkomen bepaald en is evenredig met het trillingsgetal. Men drukt dit ook zoo uit: de energie-uitwisseling heeft slechts plaats in afgepaste porties, quanta, of: de energie treedt slechts in quanta op. Maar men zij op zijn hoede hier niet van een ‘eigenschap van de energie’ te gaan spreken. Dat dit verleidelijk is, wil ik aan het volgende voorbeeld laten zien. Ik kies daarvoor weer de straling.

De onjuistheid van de equipartitie-wet is bij de straling wel zeer in 't oog vallend. Voor het oneindige aantal vrijheidsgraden zou de totale energie immers oneindig groot worden, de soortelijke warmte evenzoo. Ook een streven van den aether naar gelijk verdeelen van de energie over al zijn vrijheidsgraden is reeds ondenkbaar. Door hun groot aantal zouden de snelste trillingen dan te zamen steeds meer energie moeten krijgen, en de energie van de waarneembare trillingen, of ook van moleculen, zou steeds verder naar die snellere trillingen moeten overgaan. De energie zou dus wel niet verloren gaan, maar toch als 't ware in den aether ‘verdrinken’. Hoe eenvoudig is het in te zien dat dit ‘wegzakken en verdrinken’ voorkomen wordt door de vermeende eigenschap van de energie, niet onbeperkt deelbaar te zijn. Deze zal het immers onmogelijk maken voor een zekere hoeveelheid energie zich over meer trillingswijzen te verdeelen, dan het aantal quanta, in die hoeveelheid bevat. Naarmate de trillingen waar het om gaat, sneller zijn, wordt het quantum bovendien grooter, de deelbaarheid van de energie dus kleiner. Voert men deze opvatting bij de berekening in, dan wordt inderdaad de wet van PLANCK

gevonden. Het verkrijgen van de juiste uitkomst is evenwel geen afdoend bewijs van de juistheid der gebruikte redeneering. De eigenlijke toedracht van zaken wordt in het aangehaalde voorbeeld waarschijnlijk het best als volgt aangegeven.

De overgang van energie van de eene aethertrilling op de andere is niet zonder meer mogelijk. Daartoe is de tusschenkomst van de materie noodig. De stralingsenergie moet door atomen eerst geabsorbeerd worden, vervolgens weer worden uitgestraald. Dat laatste geschiedt door een mechanisme dat de eigenschap heeft, alleen een volkomen bepaalde hoeveelheid energie, het quantum, daarbij af te staan. Het optreden van quanta is dus geen eigenschap van de energie, maar van de atomen, in laatste instantie een eigenschap van de onbekende wetten of van den onbekenden bouw van het straling uitzendende atoom.

Het is van zeer veel belang te achten dat de juistheid van de theoretische beschouwingen, die tot het aannemen van quanta schijnen te voeren, door directe proefneming bevestigd wordt. FRANK en HERTZ lieten - de moderne experimenteele hulpmiddelen stellen tot zooiets in staat - electronen met nauwkeurig regelbare snelheid botsen tegen de atomen in kwikdamp. Bij kleine snelheid bleek eenvoudig volkomen veerkrachtige terugkaatsing plaats te vinden: de electronen behielden hun snelheid en daarmee hun energie. Maar bij het bereiken van een scherp bepaalde snelheid veranderde het verschijnsel plotseling. De electronen werden door de kwikdamp geheel tot stilstand gebracht. Tegelijk daarmee begon die damp licht van één bepaald trillingsgetal uit te zenden. Het energie-quantum, dat volgens PLANCK bij dat trillingsgetal behoort, bleek juist gelijk te zijn aan de bewegingsenergie, die elk electron aanvoerde. Werd het electron met nog weer grooter snelheid voortgedreven, dan verminderde deze bij de botsing juist zóóveel, dat daardoor zijn energie met datzelfde quantum, of zoo mogelijk met meer dan één, afnam.

De theoretische natuurkunde heeft - en niet alleen door

deze vondst - zeker alleszins reden de nadere opheldering van de omstandigheden, waaraan het optreden van quanta te wijten is, thans vooreerst aan het experiment over te laten.

De tegenkanting, die de kwantentheorie ondervonden heeft en nog ondervindt, moet, behalve aan voor de hand liggende oorzaken, ook worden gezocht in de vrees, dat het onmogelijk moet zijn die theorie nader te grondvesten op een mechanica, of ten minste op een bewegingsleer, die op dien naam aanspraak maken kan. Welke zonderlinge, discontinue wetten zou men in elk geval verplicht zijn, voor de bewegingen der kleinste deeltjes in te voeren! Wie zóó denkt, is nog te veel bevangen in de begrippen, die de klassieke mechanica heeft ingevoerd. Door enkele opmerkingen over de mechanica der electronen, waarmede ik besluiten wil, hoop ik u dat te doen zien, door u te wijzen op de onbeperkte mogelijkheden, die zelfs in zeer eenvoudige grondformules opgesloten kunnen liggen.

Het gewone negatieve electron heeft men leeren opvatten als een electrische lading zonder materieelen drager, en dus zonder gewone massa. Hetzelfde verschijnsel, dat men in gewone afmetingen zelf-inductie noemt, heeft ook bij het electron ten gevolge dat het, eenmaal in beweging gebracht, daarin volhardt, en een kracht noodig is, om het tegen te houden, in 't algemeen om zijn snelheid te wijzigen. De begrijpelijke neiging, om bij het bekende aan te sluiten, heeft er toe geleid, daarom toch van massa van het electron te spreken, zoo noodig met de bijvoeging electro-magnetische, of *schijnbare* massa. Bij de zeer belangrijke, fundamenteele beschouwingen, die daarmee samenhangen, kan ik hier niet stilstaan. Ik wil slechts in herinnering brengen, dat die schijnbare massa niet constant, maar eenigszins van de snelheid afhankelijk wordt.

Heeft men zich aan die veranderlijkheid van de massa eenmaal gewend, dan zou de mechanica van het electron vrij ‘gewoon’ kunnen gaan lijken. Waar ik nu echter in het bijzonder de aandacht op wensch te vestigen is, dat de analogie met de klassieke mechanica alleen voor bewegingen geldt,

die langzaam veranderlijk en in alle opzichten zeer geleidelijk zijn. Alleen dan zijn de bewegingsvergelijkingen van het electron van de tweede orde. In andere gevallen wordt die orde hooger, in het algemeen zelfs oneindig hoog! Mathematisch is het dan te verkiezen, niet van differentiaal-vergelijkingen voor de beweging te spreken, maar van integraal-vergelijkingen. Het gevolg daarvan is zeer merkwaardig. Indien in het geheel geen kracht op het electron aangrijpt, is het bijvoorbeeld niet noodzakelijk in eenparige rechtlijnige beweging. Het kan zelfs op oneindig veel verschillende wijzen in trilling verkeeren. Laten we op een electron, dat in rust is, plotseling een kracht werken, dan beweegt het zich in 't geheel niet zooals een steen, dien we plotseling loslaten. Het ‘zet zich’ niet ‘in beweging’, maar neemt onmiddellijk een bepaalde snelheid aan, m.a.w. een discontinuïteit in de *kracht* heeft een discontinuïteit in de *snelheid* tengevolge. De mechanica van het electron is dus wel iets geheel anders dan waaraan wij bij dat woord nog zoo gewend zijn te denken. Toch is zij af te leiden uit enkele eenvoudige wetten, de door LORENTZ opgestelde grondvergelijking der electronentheorie.

Edelgrootachtbare heeren curatoren dezer universiteit.

Door mij voor te dragen voor dit ambt hebt gij mij in staat gesteld, mijn beste krachten te gaan wijden aan die wetenschap, die reeds vroeg in het centrum mijner belangstelling gestaan heeft. Wilt daarvoor mijn oprechten dank aanvaarden. Ik geef u de verzekering, dat ik met alle kracht er naar zal streven, in de vervulling van de zware taak, die mij wacht, mij uw vertrouwen waardig te toonen.

Hooggeleerde heeren professoren in de faculteit der wis- en natuurkunde.

Nog onervaren, kom ik aan uw uitnoodiging gehoor geven om een bescheiden plaats in uw midden in te nemen. De

groote welwillendheid, reeds herhaaldelijk van velen uwer ondervonden, geven mij den moed daartoe en doen mij vertrouwen, dat gij met uw rijpere kennis en ervaring mij raad en steun zult willen geven, waar ik die zal behoeven.

Hooggeleerde Haga.

De welwillende voorlichting waarmede gij ook vroeger mij reeds herhaaldelijk hebt begunstigd, geven mij het vooruitzicht op een aangename en vruchtdragende samenwerking. Ook voor de bereidwilligheid, waarmede gij mij in staat wilt stellen de experimenteele zijde onzer wetenschap te blijven beoefenen, wensch ik u mijn hartelijken dank te brengen.

Hooggeachte Kapteyn.

Ik weet dat gij het betreurt, dat ik thans de wetenschap die u lief is, vaarwel zeg, nog eer ik haar genoeg beoefend heb, om haar volle aantrekkingskracht te ondervinden. Toch heb ik onder uw bezielende leiding wel zóóveel van haar bekoring bespeurd, dat het ook mij zeer leed doet, haar te verlaten. Houd u er dan ook van overtuigd dat ik slechts heenga omdat het betere nu eenmaal de vijand is van het goede.

Waarde Ornstein.

Het is hier niet de plaats de gevoelens van vriendschap, die mij met u verbinden, tot uitdrukking te brengen. Maar ik wil de plaats, die gij op zoo gelukkige wijze bekleed hebt, niet gaan innemen, zonder eens te zeggen, hoeveel ik op wetenschappelijk gebied aan u te danken heb. Moge de hier te Groningen zoo aangenaam begonnen samenwerking door den grooteren afstand, die ons scheidt, niet geschaad worden.

Dames en heeren studenten in de faculteit der wis- en natuurkunde.

Ik acht het een voorrecht, in het vervolg uw leider te zijn

bij een deel van uw studie. Rekent op mijn groote belangstelling in uw streven naar kennis, en op mijn ontvankelijkheid voor de wenschen en bezwaren, die zich bij uw studie mochten voordoen. Zoo ik bij u ontvankelijkheid voor het schoone van de wetenschap mocht vinden, zal mijn taak een aangename en verheffende zijn.

Ik heb gezegd.